文章编号： 1007-4627(2024) 000001-13

国内外介子束流实验的发展现状和未来计划

王晓云[1, 2]，刘 翔[3, 2, 4, 5]

(1. 兰州理工大学理学院，兰州 730050；
3. 兰州大学物理科学与技术学院，兰州 730000；
2. 兰州理论物理中心，兰州 730000；
4. 量子理论与应用基础教育部重点实验室，兰州 730000；
5. 教育部稀有同位素前沿科学中心，兰州 730000)

摘要：介子束流与原子核碰撞实验在中高能核物理和粒子物理研究领域发挥了重要推动作用，特别是在强子谱研究方面取得了一系列重要实验测量结果。本文对目前国际上几个比较典型的介子束流实验进行了梳理与总结，这包括了位于日本的 J-PARC 实验；欧洲核子中心的 COMPASS 实验、AMBER 实验以及计划中的 HIKE 实验；美国 JLab 的 GlueX 实验和 EIC 项目。进一步，我们基于国内的 HIAF 装置对可能产生的次级介子束流的参数指标进行了分析估算，并讨论了可以开展的相关物理测量。通过对这些实验项目的调研分析，旨在为进一步规划和建造我国的介子束流实验装置并开展强子物理方面的研究有所启发和借鉴。

关键词：介子束流实验；强子物理；中高能核物理
中图分类号：O571.53 **文献标志码：**A **DOI：**10.11804/NuclPhysRev.00.01.01

引言

介子束流通常是指 K 介子束流和 π 介子束流。介子束流实验是一类重要的强子碰撞实验，通过此类实验可以为理解强相互作用非微扰问题乃至宇宙物质演化等提供更加全面的信息，还可以更进一步地探索 K 介子和 π 介子的衰变过程[1-4]、相应的粒子性质及内部结构、以及对称性破缺和超越标准模型的新物理等。

在物理学发展史上，原子光谱学曾经对揭示原子结构和量子电动力学(Quantum Electrodynamics,简称QED)的发展发挥了重要作用。不仅使得核物理学研究快速发展，也导致 QED 成为量子场论中最成熟的一个分支，并能够给出非常精确的结果。与此类似，强子谱也成为了我们研究强子内部结构和强相互作用的有效手段，相关探索不仅涉及粒子物理的精度前沿，也成为了中高能核物理学的研究前沿。过去几十年中，介子束流实验在强子谱研究中发挥了至关重要的作用，不仅为确定相关强子的产生机制和性质提供了有价值的实验数据，也为我们更好地理解强相互作用和完善量子色动力学（Quantum Chromodynamics,简称QCD）理论做出了重要贡献。事实上，通过检索粒子物理的重要数据文献，特别是从 PDG（Particle Data Group）中可以发现[5]，所收录的轻强子谱中的八成以上粒子及其相关谱学性质都来自介子束流与原子核碰撞实验。表1和表2中分别列出了 PDG 所收录的轻介子谱和轻重子谱，其中勾选的粒子涉及介子束流实验。显然，介子束流实验在过去几十年的强子谱的研究中扮演着不可或缺的角色。除了实验进展外，近年来理论家也对与 K 介子和 π 介子有关的散射过程进行了一些研究，探讨了新强子态的产生问题[6-26]。

相关的实验和理论工作都表明，介子束流实验在强子谱及相关物理问题的研究中具有独特的优势。因此，我们有必要对目前国际上的相关介子束流实验进行梳理总结，为未来我国规划和建造相关实验提供一定的参考。

在本文中，我们选取了目前国际上正在进行和计划中的相关 K 介子和 π 束流实验进行简要介绍，并对基于我国的强流重离子加速器（HIAF）可能产生的介子束流情况进行了初步计算分析。具体内容包括：

- 日本 J-PARC 的强子碰撞实验；
- 欧洲核子中心已经完成了 COMPASS 实验上的数据采集、目前正在进行的 AMBER 实验和未来计划中的 HIKE 实验；
- 美国杰斐逊实验室（JLAB）的介子束流实验计划；
- 美国电子离子对撞机（EIC）上计划开展的介子束流实验；

收稿日期：2024-03-22； 修改日期：2024-03-22
基 金 项 目： 国家自然科学基金资助项目（11175257,12247101,12335001,11825503,12065014）；甘肃省拔尖领军人才项目；中央高校基本科研业务费；“西部之光”青年学者项目（21JR7RA201）
作者简介：；E-mail: xywang@lut.edu.cn
通信作者：E-mail: xiangliu@lzu.edu.cn

- 基于中国的强流重离子加速器装置（HIAF）的介子束流实验展望

1 目前建造和规划的介子束流实验

1.1 J-PARC 实验

J-PARC（Japan Proton Accelerator Research Complex）是位于日本的综合性加速器实验装置[27-30]。它可以为多个学科和领域的研究提供高能质子束和次级介子束，其研究范围涵盖了粒子物理、核物理、原子分子物理、凝聚态物理、生命科学以及工业应用等多个领域。在强子物理实验方面，J-PARC 利用质子束流和介子束流，来探索构成宇宙的粒子的性质及相互作用。这些研究对于我们理解宇宙的演化并推动相关领域的发展至关重要。

目前，J-PARC 的强子实验设备中正在运行的 K 介子束流实验包括低动量带电 K 介子束流线（K1.8/ K 1.8BR）、中性 K 介子束流线（KL）和主质子束流线[31]（high-p）。2023 年，J-PARC 还投入了一条新的主束流线，专门用于进行缪子到电子转换实验（COMET）。我们将 J-PARC 的实验束流参数及相关实验目标在表格中进行呈现:

- 表3总结了 J-PARC 正在进行实验和即将扩展实验束流线的参数。
- 表4收集了 J-PARC 目前已经完成的多个介子束流实验。
- 表5给出了 J-PARC 目前正在进行的和未来计划中的介子束流实验。

J-PARC 作为一个强子实验设施，目前在几个 GeV 能量范围内能够提供最高强度的介子（K 介子和 π 介子）束流，这为粒子物理和核物理研究提供了极佳的实验平台。正是基于这个优势，J-PARC 能够开展一些其它类似实验无法完成的研究任务，这包括 $S = -2$ 的超核系统的结构和性质的研究、奇异物质的状态方程的研究以及基于中性 K 衰变的新物理学测量等。在强子谱研究方面，J-PARC 实验扮演着重要角色，许多关于轻强子的测量结果都被 PDG 收录其中[5]。如表5所示，未来 J-PARC 实验仍将研究强子谱作为其主要物理目标之一。值得注意的是，随着束流质量的提升和相关设备的升级，J-PARC 实验还计划对双重子共振态和粲重子谱学进行研究[45]。

目前，在涉及轻夸克能区，学界对质量在 1.7 GeV 附近及以下的核子激发态的性质有了基本的共识，但对高质量区域的核子激发态性质的认识还很不充分。相关理论研究和实验迹象表明，一些轻味重子内部含有可观的奇异夸克对 ($s\bar{s}$) 成份，从而形成隐奇异五夸克态。然而，目前隐奇异五夸克态仍未在实验上被确认，这亟待通过实验和理论的联合努力对这一问题进行澄清。2015 年，欧洲核子中心的 LHCb 实验观测到的几个 P_c 态，可以是隐粲五夸克态的候选者[46]。2019 年，LHCb 实验的更高精度实验结果揭示了 P_c 态的特征能谱[47]，表明 P_c 态是分子态类型的隐粲五夸克态[48-54]。然而，由于这几个 P_c 态都是在 Λ_b 衰变过程观测到的，有可能会遭遇到三角奇点效应所导致的非共振态现象。而介子束流散射实验将避免以上问题，可为研究隐粲五夸克态、粲重子谱及相关强子态的性质提供独特的平台。事实上，寻找和研究粲重子的最自然的方式是通过分析含有粲夸克末态强子的散射过程来抽取相关奇特重子态的物理信息，例如我们可以通过 $\pi^- p \to D^{(*)}\Sigma_C^{(*)}$ 或 $\pi^- p \to D^{(*)}\Lambda_C^{(*)}$ 等散射过程来研究粲重子的产生。J-PARC 实验将计划对以上散射过程进行测量，相关结果将有助于完善粲重子谱，并为阐明强子中夸克间的相互作用（特别是双夸克的内部关联）等问题提供更多有价值的信息。

图1给出了通过介子束流实验研究粲重子的费曼图，基于 J-PARC 正在建造的高动量束流线将为实现该反应过程的测量提供动量分辨高达 0.1% 和强度约为 20 GeV/c 的高能 π 介子束流。同时，J-PARC 计划使用接受度范围更大的磁谱仪对 D^* 介子和粲重子 $Y_C^{(*)}$ 进行分离，之后利用探测谱仪在大角度范围内对粲重子的衰变末态进行探测，并通过丢失质量谱对粲重子进行重建。另外，J-PARC 还将对粲重子的衰变分支比、自旋宇称和能级结构等物理量进行测量，为粲重子谱及相关物理问题研究提供数据参考。

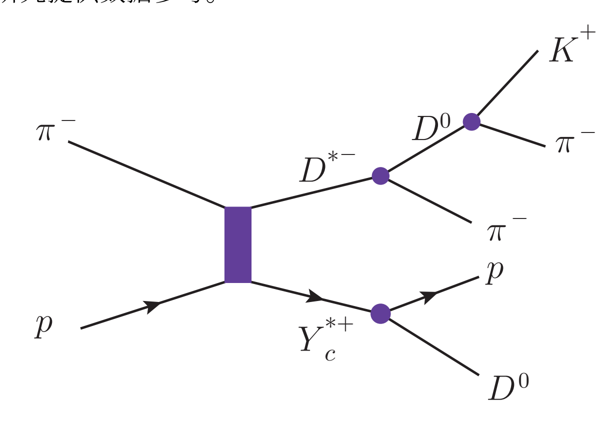


图 1 通过 $\pi^- p$ 散射产生过程产生粲重子 $Y_C^{(*)}$ 的费曼图

以上研究需要基于高强度的介子束流和先进的探测器系统。目前，J-PARC 正在进行设备的升级和改造，预计将在 2027 年之前完成相关改进工作。这将进一步提升 J-PARC 的实验能力，为后继研究提供实验支撑。

表 1　PDG 中收录的轻介子谱[5]（勾选的粒子都被介子束流实验进行过测量）

粒子	J^P	介子束流实验	粒子	J^P	介子束流实验	粒子	J^P	介子束流实验	粒子	J^P	介子束流实验
η	0^-	√	$\rho(1450)$	1^-		$\eta_2(1870)$	2^-	√	$\rho_5(2350)$	5^-	√
$f_0(500)$	0^+		$\eta(1475)$	0^-	√	$\pi_2(1880)$	2^-	√	$f_6(2510)$	6^+	√
$\rho(770)$	1^-	√	$f_0(1500)$	0^+	√	$\rho(1900)$	1^-		$K_0^*(700)$	0^+	√
$\omega(782)$	1^-	√	$f_1(1510)$	1^+	√	$f_2(1910)$	2^+	√	$K^*(892)$	1^-	√
$\eta'(958)$	0^-	√	$f_2'(1525)$	2^+	√	$a_0(1950)$	0^+		$K_1(1270)$	1^+	√
$f_0(980)$	0^+	√	$f_2(1565)$	2^+	√	$f_2(1950)$	2^+	√	$K_1(1400)$	1^+	√
$a_0(980)$	0^+	√	$\rho(1570)$	1^-	√	$\rho_3(1990)$	3^-		$K^*(1410)$	1^-	√
$\phi(1020)$	1^-	√	$h_1(1595)$	1^+	√	$\pi_2(2005)$	2^-	√	$K_0^*(1430)$	0^+	√
$h_1(1170)$	1^+	√	$\pi_1(1600)$	1^-	√	$f_2(2010)$	2^+	√	$K_2^*(1430)$	2^+	√
$b_1(1235)$	1^+	√	$a_1(1640)$	1^+	√	$f_0(2020)$	0^+	√	$K(1460)$	0^-	√
$a_1(1260)$	1^+	√	$f_2(1640)$	2^+	√	$a_4(2040)$	4^+	√	$K_2(1580)$	2^-	√
$f_2(1270)$	2^+	√	$\eta_2(1645)$	2^-		$f_4(2050)$	4^+	√	$K(1630)$	?	√
$f_1(1285)$	1^+	√	$\omega(1650)$	1^-		$\pi_2(2100)$	2^-	√	$K_1(1650)$	1^+	√
$\eta(1295)$	0^-		$\omega_3(1670)$	3^-	√	$f_0(2100)$	0^+		$K^*(1680)$	1^-	√
$\pi(1300)$	0^-		$\pi_2(1670)$	2^-	√	$f_2(2150)$	2^+		$K_2(1770)$	2^-	√
$a_2(1320)$	2^+	√	$\phi(1680)$	1^-		$\rho(2150)$	1^-		$K_3^*(1780)$	3^-	√
$f_0(1370)$	0^+		$\rho_3(1690)$	3^-	√	$\phi(2170)$	1^-		$K_2(1820)$	2^-	√
$h_1(1380)$	1^+		$\rho(1700)$	1^-	√	$f_0(2200)$	0^+	√	$K(1830)$	0^-	√
$\pi_1(1400)$	1^-	√	$a_2(1700)$	2^+	√	$f_J(2220)$	$2^+, 4^+$		$K_0^*(1950)$	0^+	√
$\eta(1405)$	0^-	√	$f_0(1710)$	0^+	√	$\eta(2225)$	0^-		$K_2^*(1980)$	2^+	√
$f_1(1420)$	1^+	√	$\eta(1760)$	0^-		$\rho_3(2250)$	3^-	√	$K_4^*(2045)$	4^+	√
$\omega(1420)$	1^-		$\pi(1800)$	0^-	√	$f_2(2300)$	2^+	√	$K_2(2250)$	2^-	√
$a_1(1420)$	1^+	√	$f_2(1810)$	2^+	√	$f_4(2300)$	4^+		$K_3(2320)$	3^+	√
$f_2(1430)$	2^+	√	$X(1835)$	0^-		$f_0(2330)$	0^+		$K_5^*(2380)$	5^-	√
$a_0(1450)$	0^+	√	$\pi_3(1850)$	3^-	√	$f_2(2340)$	2^+	√	$K_4(2500)$	4^-	√

1.2　欧洲核子中心的相关介子束流实验

欧洲核子中心（CERN）是位于瑞士日内瓦的世界上最大的粒子物理研究机构，其中 COMPASS（Common Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy）实验是 CERN 的一个重要的大型实验项目。COMPASS 实验位于 CERN 的超级质子同步加速器（SPS）的 M2 束流线上[55-65]，该实验目前已完成了预定的实验计划，并在 2022 年完成了最后一次数据采集。目前，研究人员计划在同一实验大厅开展一个名为 AMBER（Apparatus for Meson and Baryon Experimental Research）的新实验项目。AMBER 实验计划使用一种新的射频分离的 K 介子束流来进行与 COMPASS 实验相似的物理研究[66-67]。此外，在 CERN 的超级质子同步加速器上还将计划推进 HIKE 实验（High Intensity Kaon Experiments）。该项目[68-70] 计划将以前所未有的精度水平，通过测量 K 介子衰变过程对稀有产生过程、CP 破缺、暗物质，对称性以及标准模型检验等物理问题进行探索，从而获得对粒子物理基本性质的更深入理解。下面，我们将依次对这些实验项目进行介绍。

1.2.1　COMPASS 实验

COMPASS 实验是利用超级质子同步加速器上的高亮度、高极化度的强子束流与不同的靶材料相互作用，来研究强子结构和谱学问题的实验装置[55-65]。该实验的研究内容涉及强子内部的动力学行为、夸克胶子相互作用以及磁矩等物理内容。为了实现这些研究目标，COMPASS 实验采用了一套复杂而庞大的实验装置，其中最重要的是多功能的磁谱仪（Magnetic Spectrometer）和粒子探测器系统。这些装置能够对散射反应和产生的次级粒子进行精确的探测和测量，并通过分析次级粒子的动能、动量、角度等参数，来揭示强子的内部结构和物理性质。

COMPASS 项目的主要物理目标是探索质量在 2 GeV 以下的轻介子谱学性质和相关物理问题，其中涉及的一个关键的反应过程是 $\pi^- p \to \pi^-\pi^-\pi^+ + P_{recoil}$。COMPASS 已经通过高质量的 π^- 束流的碰撞实验，采集了大约五千万个事例样本，并对该数据样本进行了分波分析工作，从而提取出在 $\pi^-\pi^-\pi^+$ 不变质量谱中可能存在的 π_J 和 a_J 共振态的共振参数（J 为共振态的总角动量）。在过去的实验测量中，COMPASS 给出了一系列相关的实验结果。例如，COMPASS 通过实验测量给出了 $a_1(1640)$

表 2 PDG 中收录的轻重子谱[5]（勾选的粒子都被介子束流实验进行过测量）

粒子	J^P	介子束流实验	粒子	J^P	介子束流实验	粒子	J^P	介子束流实验	粒子	J^P	介子束流实验
N(1440)	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Delta(1620)$	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Lambda(1820)$	$\frac{5}{2}^+$	√	$\Sigma(2010)$	$\frac{3}{2}^-$	√
N(1520)	$\frac{3}{2}^-$	√	$\Delta(1700)$	$\frac{3}{2}^-$	√	$\Lambda(1830)$	$\frac{5}{2}^-$	√	$\Sigma(2030)$	$\frac{7}{2}^+$	√
N(1535)	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Delta(1750)$	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Lambda(1890)$	$\frac{3}{2}^+$	√	$\Sigma(2070)$	$\frac{5}{2}^+$	√
N(1650)	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Delta(1900)$	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Lambda(2000)$	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Sigma(2080)$	$\frac{3}{2}^+$	√
N(1675)	$\frac{5}{2}^-$	√	$\Delta(1905)$	$\frac{5}{2}^+$	√	$\Lambda(2050)$	$\frac{3}{2}^-$	√	$\Sigma(2100)$	$\frac{7}{2}^-$	√
N(1680)	$\frac{5}{2}^+$	√	$\Delta(1910)$	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Lambda(2070)$	$\frac{3}{2}^+$	√	$\Sigma(2160)$	$\frac{1}{2}^-$	√
N(1700)	$\frac{3}{2}^-$	√	$\Delta(1920)$	$\frac{3}{2}^+$	√	$\Lambda(2080)$	$\frac{5}{2}^-$	√	$\Sigma(2230)$	$\frac{3}{2}^+$	√
N(1710)	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Delta(1930)$	$\frac{5}{2}^-$	√	$\Lambda(2085)$	$\frac{7}{2}^+$	√	$\Sigma(2250)$	?	√
N(1720)	$\frac{3}{2}^+$	√	$\Delta(1940)$	$\frac{3}{2}^-$	√	$\Lambda(2100)$	$\frac{7}{2}^-$	√	$\Sigma(2455)$	?	√
N(1860)	$\frac{5}{2}^+$	√	$\Delta(1950)$	$\frac{7}{2}^+$	√	$\Lambda(2110)$	$\frac{5}{2}^+$	√	$\Sigma(2620)$	?	√
N(1875)	$\frac{3}{2}^-$	√	$\Delta(2000)$	$\frac{5}{2}^+$	√	$\Lambda(2325)$	$\frac{3}{2}^-$	√	$\Sigma(3000)$	?	√
N(1880)	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Delta(2150)$	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Lambda(2350)$	$\frac{9}{2}^+$	√	$\Sigma(3170)$	?	√
N(1895)	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Delta(2200)$	$\frac{7}{2}^-$	√	$\Lambda(2585)$	?	√	Ξ^0	$\frac{1}{2}^+$	√
N(1900)	$\frac{3}{2}^+$	√	$\Delta(2300)$	$\frac{9}{2}^+$	√	Σ^+	$\frac{1}{2}^+$	√	Ξ^-	$\frac{1}{2}^+$	√
N(1990)	$\frac{7}{2}^+$	√	$\Delta(2350)$	$\frac{5}{2}^-$	√	Σ^0	$\frac{1}{2}^+$		$\Xi(1530)$	$\frac{3}{2}^+$	√
N(2000)	$\frac{5}{2}^+$	√	$\Delta(2390)$	$\frac{7}{2}^+$	√	Σ^-	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Xi(1620)$	?	√
N(2040)	$\frac{3}{2}^+$		$\Delta(2400)$	$\frac{9}{2}^-$	√	$\Sigma(1385)$	$\frac{3}{2}^+$	√	$\Xi(1690)$	?	√
N(2060)	$\frac{5}{2}^-$	√	$\Delta(2420)$	$\frac{11}{2}^+$	√	$\Sigma(1580)$	$\frac{3}{2}^-$	√	$\Xi(1820)$	$\frac{3}{2}^-$	√
N(2100)	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Delta(2750)$	$\frac{13}{2}^-$	√	$\Sigma(1620)$	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Xi(1950)$	?	√
N(2120)	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Delta(2950)$	$\frac{15}{2}^+$	√	$\Sigma(1660)$	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Xi(2030)$	?	√
N(2190)	$\frac{7}{2}^-$	√	Λ	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Sigma(1670)$	$\frac{3}{2}^-$	√	$\Xi(2120)$	?	√
N(2220)	$\frac{9}{2}^+$	√	$\Lambda(1405)$	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Sigma(1750)$	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Xi(2250)$	?	√
N(2250)	$\frac{9}{2}^-$	√	$\Lambda(1520)$	$\frac{3}{2}^-$	√	$\Sigma(1775)$	$\frac{5}{2}^-$	√	$\Xi(2370)$	?	√
N(2300)	$\frac{1}{2}^+$		$\Lambda(1600)$	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Sigma(1780)$	$\frac{3}{2}^+$	√	$\Xi(2500)$	?	√
N(2570)	$\frac{5}{2}^-$		$\Lambda(1670)$	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Sigma(1880)$	$\frac{1}{2}^+$	√	Ω^-	$\frac{3}{2}^+$	√
N(2600)	$\frac{11}{2}^-$	√	$\Lambda(1690)$	$\frac{3}{2}^-$	√	$\Sigma(1900)$	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Omega(2012)-$	?	
N(2700)	$\frac{13}{2}^+$	√	$\Lambda(1710)$	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Sigma(1910)$	$\frac{3}{2}^-$	√	$\Omega(2250)-$	?	√
$\Delta(1232)$	$\frac{3}{2}^+$	√	$\Lambda(1800)$	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Sigma(1915)$	$\frac{5}{2}^+$	√	$\Omega(2380)-$	?	
$\Delta(1600)$	$\frac{3}{2}^+$	√	$\Lambda(1810)$	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Sigma(1940)$	$\frac{3}{2}^+$	√	$\Omega(2470)-$	?	√

表 3　J-PARC 强子实验设备的束线规格[28]

	粒子	动量	强度
目前强子实验束流线			
K1.8	$K^{\pm}, \pi^{\pm}$	$1.0-2.0\mathrm{GeV}/c$	$\sim 10^{6} K^{-}$/ 喷注
K1.8BR	$K^{\pm}, \pi^{\pm}$	$< 1.1\mathrm{GeV}/c$	$\sim 5\times10^{5} K^{-}$/ 喷注
KL	K_L	$2.1\mathrm{GeV}/c$	$10^{7} K_L$/ 喷注
high-p	p		10^{10}p/ 喷注
π20	$\pi^{\pm}$	$< 31\mathrm{GeV}/c$	$10^{7}\pi$/ 喷注
COMET	μ^{-}		
扩展实验的束流线			
K1.1	$K^{\pm}, \pi^{\pm}$	$< 1.2\mathrm{GeV}/c$	$\sim 4\times10^{5} K^{-}$/ 喷注
K1.1BR	$K^{\pm}, \pi^{\pm}$	$0.7-0.8\mathrm{GeV}c$	$\sim 1.5\times10^{5} K^{-}$/ 喷注
HIHR	$\pi^{\pm}$	$< 2.0\mathrm{GeV}/c$	$\sim 2\times10^{8}\pi$/ 喷注
K10	$K^{\pm}, \pi^{\pm}, \bar{p}$	$< 10\mathrm{GeV}/c$	$\sim 7\times10^{6}\ K^{-}$/ 喷注
KL2	K_L	$\sim 5\mathrm{GeV}/c$	$\sim 4\times10^{7}\quad K_L$/ 喷注

表 4　在 J-PARC 设备上已完成的实验[28,32-43]

	束流	束流粒子	实验
E03	K1.8	K^{-}	测量来自 Ξ 原子的 X 射线
E05	K1.8	K^{-}	通过 $^{12}\mathrm{C}K^{-}\to K^{+}\Xi^{-}$ 反应研究 ΞN的相互作用
E07	K1.8	K^{-}	通过混合使用乳胶探测器和计数器的方法对双奇异系统进行研究
E10	K1.8	π^{-}	通过双电荷交换反应产生含有丰中子的 Λ 超核
E13	K1.8	K^{-}	轻超核的伽马射线光谱学研究
E19	K1.8	π^{-}	通过 $\pi^{-}p$ 散射过程寻找五夸克态 Θ^{+}
E27	K1.8	π^{+}	通过 $\pi^{+}d$ 碰撞过程寻找含 K 介子的束缚态
E40	K1.8	$\pi^{\pm}$	Σp 散射总截面测量
E42	K1.8	K^{-}	使用更高接收能力的超子谱仪搜索双重子
E15	K1.8BR	K^{-}	通过 $^{3}HeK^{-}\to\Lambda pn$ 过程寻找 $\bar{K}NN$ 束缚态
E31	K1.8BR	K^{-}	通过 $K^{-}d\to\Lambda\pi^{+}\pi^{-}n$ 反应研究 $\bar{K}N$ 阈值以下的超子共振态
E36	K1.1BR	K^{+}	对$\Gamma\left(K^{+}\to e^{+}\bar{\nu}\right)/\Gamma\left(K^{+}-\ \mu^{+}\nu\right)$ 分支比的测量； 使用 TREK 探测器系统寻找惰性中微子

和 $a_2(1700)$ 分别作为 $a_1(1260)$ 和 $a_2(1320)$ 的第一径向激发态的物理证据。

近些年，COMPASS 开展了不少介子束流实验，主要瞄准以下三个方面的物理问题：

- Primakoff 物理实验研究。利用 Primakoff 效应的独特动力学筛选条件，可对 QCD 对称性的严格检验、强子的电弱相互作用性质及超标准模型物理方面的问题进行研究。
- 介子谱学及相关物理问题的实验研究。通过分析实验数据并拟合发现的共振态结构，COMPASS 实验能够抽取相关轻介子谱的关键物理参数，为进一步验证和完善相关理论模型提供有价值的信息。
- 针对自旋物理的介子束流与极化靶散射的 Drell-Yan 过程实验测量。

表 6列出了近几年 COMPASS 实验中介子束流实验的部分结果。目前，COMPASS 已经完成预定的实验测量目标，并于 2022 年完成了最后一次数据采集。

1.2.2　AMBER 实验

AMBER 是在 CERN 的超级质子同步加速器的 M2 束流线上进行的一项新型固定靶实验[66-67]，致力于各种基本 QCD 的测量。其核心物理目标是强子性质的研究，包括强子质量来源、电荷半径、部分子结构等与 QCD 手征对称性破缺有关的基本问题。

AMBER 项目计划分为两个阶段进行。其中第一阶段实验将解决三个主要的物理问题：

- 在 50 GeV 到 280 GeV 能量范围内对质子束轰击氦目标靶产生反质子的散射截面进行高精度测量，以进一步探索暗物质的性质和存在。
- 对于质子半径问题，拟采用高能介子束（100 GeV）对质子形状因子进行测量。
- 利用能量为 190 GeV 的介子束测量粲偶素的产生截面，并获取 K 介子和 π 介子的部分子分布函数

表 5　在 J-PARC 设备上正在进行和计划开展的实验[28,43-45]

	束流	束流粒子	实验	实验状态
E08	K1.8	π^+	π 介子与氧原子的双电荷交换实验	计划
E18	K1.8	π^+	${}^{12}_{\Lambda}C$的弱衰变与三体弱相互作用过程的测量	计划
E22	K1.8	π^+	核子数 A=4 的 Λ 超核中的弱相互作用研究	计划
E26	K1.8	π^-	在相关反应和$\omega \to \pi^0\gamma$衰变中对ω质量修正的直接测量	计划
E45	K1.8	K^-	重子谱学中三体强子过程的研究	计划
E70	K1.8	K^-	使用 S-2S 光谱仪进行下一代 E05 系统的运行	计划
E75	K1.8	K^-	通过 Ξ 超核衰变产生 ${}^{5}_{\Lambda\Lambda}H$ 的衰变 π 介子谱学研究	计划
E57	K1.8BR	K^-	K 介子与氘和散射中第一能级强相互作用引起的位移和宽度的测量	计划
E72	K1.8BR	K^-	通过$K^-p \to \Lambda\eta X$散射过程寻找窄共振态Λ^*	计划
E73	K1.8BR	K^-	通过${}^{3,4}\mathrm{He}K^- \to {}^{3,4}_{\Lambda}H\pi^0$反应测定${}^{3}_{\Lambda}H$和${}^{4}_{\Lambda}\mathrm{H}$介子核的弱衰变寿命	计划
E80	K1.8BR	K^-	通过 K^- 束流实验研究轻 K 介子谱	计划
E14	KL	K_L^0	$K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 实验测量	正在进行
E16	high-p	p	利用 J-PARC 中的电子对谱仪 研究 QCD 的手性对称性	正在进行
E50	high-p	π^-	通过介子束流实验研究粲重子谱学	计划
E79	high-p	p	寻找同位旋 $I=3$ 的双重子共振态	计划
E29	K1.1	$\bar{p}$	通过原子核内的ϕ介子束缚态对ϕ介子质量修正的研究	计划
E63	K1.1	K^-	E13 实验第二阶段测量	计划
E21	COMET	μ^-	以10^{-16}的灵敏度在慢提取束流中进行$\mu-e$转换实验测量	计划

表 6　在 COMPASS 设备上已完成的部分实验[57-65]

束流	束流粒子	实验
M2	K^-	利用 K^- 介子束研究奇异介子谱
M2	π^-	探索核子的横向自旋结构
M2	π^-	基于 π^- 与原子核散射数据对双 J/Ψ 产生过程进行分析
M2	π^-	基于 $\pi^-p \to \pi^-\pi^-\pi^+p$ 过程对 $\pi_1(1600) \to \rho(770)\pi$ 振幅的研究
-	π^-	轻介子 Freed-Isobar 模型的分析研究
M2	K	首次给出了在 DIS 过程中 $p/\bar{p}$ 的 multiplicity ratio 结果
-	π^-	通过高能 π^- 介子束流与钨靶的相互作用对 Drell-Yan 截面进行测量

（PDF）。

在第二阶段中，计划对 M2 束流线进行升级，以获得更强的介子束流。目前正在讨论两种方案：一种是通过射频方法分离现有的 M2 强子束中的介子，以便将主要的介子束和（反）质子束进行分离；另一种方案是利用增强的 M2 束流线来增加介子束流的强度，从而对更多物理目标进行实验测量。表7中详细列出了 AMER 项目计划在 M2 束流线展开的相关实验测量和物理目标。

AMBER 的最终目标是通过实验测量，给出国际领先的关于轻介子谱数据样本，从而对高能介子打靶过程中产生的奇异介子谱进行细致研究。由于该项目是基于多种轻介子束流和出色的束流鉴别系统，可整体提高实验装置的接收范围、探测效率和粒子鉴别能力。与目前已有的数据样本相比, AMBER 计划将数据量增加 25 倍。通过这些改进，AMBER 将为研究人员提供更丰富、更精确的数据, 从而为轻介子谱的研究提供重要实验数据。

1.2.3　HIKE 实验

HIKE（High Intensity Kaon Experiments）是计划在位于 CERN 的 ECN3 北区实验大厅进行的高强度 K 介子束流实验的装置[68-70]。此前，CERN 的 NA62 实验上曾开展过较为精确的 K 衰变实验[71]，而 HIKE 将以更高的束流强度和更先进的探测技术在 ECN3 上继续开展此类实验。HIKE 的研究范围几乎涵盖了 K 物理能触及的所有方面, 包括超稀有 K 衰变的精确测量以及新物理的研究等等。

HIKE 实验主要分为三个阶段[70]：

- 第一阶段：使用高强度 K^+ 束流 (其强度约为 NA62 实验的 4 倍)，精确测量诸如 $K^+ \to \pi^+\nu\bar{\nu}$ 等带电 K 介子的衰变模式。
- 第二阶段：使用高强度 K_L 束流 (其强度约为 NA62 实验的 6 倍), 精确测量诸如 $K_L \to \pi^0 l^+ l^-$ 等中性 K 介子的衰变模式。
- 第三阶段：专注于 $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 的测量，并预期将分

表 7　M2 束流线未来计划开展的相关实验 (RF 代表射频分离束流)[66]。

过程	物理 目标	束流能量 [GeV]	束流强度 [s^{-1}]	触发率 [kHz]	束流类型	目标靶	开始时间 (持续时间)	硬件添加
μ介子-质子 弹性散射	质子半径的精确测量	100	$4\cdot10^6$	100	$\mu^\pm$	高压 H2	2022 年 (1 年)	时间投影室, SciFi 触发器, 硅否决器
硬排斥反应	广义部分子分布的测量	160	$2\cdot10^7$	10	$\mu^\pm$	$NH_3^\uparrow$	2022 年 (2 年)	反冲硅 改良的极化靶磁体
暗物质 搜索的输入	反质子产生截面的测量	20-280	$5\cdot10^5$	25	p	LH2, LHe	2022 年 (1 个月)	液氦靶
反质子束流打靶	寻找奇异重夸克	12,20	$5\cdot10^7$	25	$\bar{p}$	LH2	2022 年 (2 年)	目标光谱仪: 跟踪器，量热计
Drell-Yan 过程	确定π介子部分子分布函数	190	$7\cdot10^7$	25	$\pi^\pm$	C/W	2022 年 (1-2 年)	
Drell-Yan 过程 (RF)	确定 K 介子部分子分布函数 以及核子横动量相关分布	~100	10^8	25-50	$K^\pm,\bar{p}$	$NH_3^\uparrow$, C/W	2026 年 (2-3 年)	有源吸收器, 顶点检测器
Primakoff 效应 (RF)	测量 K 介子极化率与π介子寿命	~100	$5\cdot10^6$	>10	K^-	Ni	2026 年 (1 年)	
瞬发光子产生 (RF)	确定介子中的胶子分布函数	⩾100	$5\cdot10^6$	10-100	$K^\pm$ $\pi^\pm$	LH2, Ni	2026 年 (1-2 年)	描迹仪
K介子束流打靶 (RF)	奇异介子谱的高精度测量研究	50-100	$5\cdot10^6$	25	K^-	LH2	2026 年 (1 年)	反冲 TOF 探测器 粒子识别 (PID) 技术
矢量介子产生 (RF)	自旋密度矩阵元的研究	50-100	$5\cdot10^6$	10-100	$K^\pm$ $\pi^\pm$	从 H 到 Pb	2026 年 (1 年)	

支比的相对测量精度提高 20%。后续依托该阶段的高精度实验设备，同样可以对一些其它的稀有衰变进行测量。

表8对 HIKE 实验计划研究的重要物理目标进行了汇总。简言之，HIKE 实验对 K 物理相关的稀有衰变与新物理的寻找有着极高的灵敏度，并将以前所未有的精度去寻找和测量参与弱相互作用的粒子。由于 HIKE 之前的 NA62 及 NA48 实验在相关 K 物理实验上取得了丰硕成果，积累了较为成熟的实验技术，这为 HIKE 实验的顺利开展奠定了基础。此外，目前 HIKE 实验的计划中将要继续研究的物理目标分为三个阶段依次进行，这使得 HIKE 实验可以在这三个阶段中不断地对相关设施进行升级，以应对在研究更复杂物理过程中所面临的挑战。实际上，这些做法也可为规划和建造我国的介子束流实验装置提供一定的参考。

1.3　JLab 上的介子束流实验

美国杰斐逊国家实验室（Jefferson Lab，简称 JLab）是正在运行的主要进行光生实验的机构，在强子谱与核子结构研究方面取得了一系列实验测量结果[72-77]。值得关注的是，自 2015 年在欧洲核子中心的 LHCb 上发现 P_c 五夸克态以来，JLab 一直致力于通过测量 $\gamma p\to J/\psi p$ 光生过程来寻找这些五夸克态[74-77]。通过光子与核子的散射过程确定五夸克态，可有效避免三角奇点的影响，更好确定五夸克态的性质。但截止目前，并未发现来自 P_c 态的明显信号，只给出了 P_c 态衰变到 $J/\psi p$ 的分支比上限[75]。以上信息提醒我们，通过强子-强子散射过程研究奇特态强子的产生和性质可能需要重新引起重视。

目前，JLab 实验室已有利用介子束流实验开展奇异强子谱及核子性质研究的实验计划。例如，JLab 在 2017 年提出，将现有的高能量、高强度的光子束定向到 GlueX 探测器前的铍靶上产生通量为 $3\times10^4 K_L/s$ 的 K_L 束流，并将其作用于液氢/液氘冷靶（LH_2/LD_2）[78]。之后利用 GlueX 探测器测量奇异超子的微分截面和自旋极化，同时结合 J-PARC 中 K^- 的测量数据进行精确的分波分析，以确定 Λ、Σ、Ξ 和 Ω 等超子谱中的共振态及其性质。此外，还计划通过研究 π-K 相互作用，确定 $I=1/2$ 和 $I=3/2$ 通道中的极点位置，并开展奇异介子谱学研究。在具体实验测量中，采用氘核靶还有助于获得关于中子的相关数据，为理论深入研究中子性质提供实验支持。

在 GlueX 上计划展开介子束流实验的初始阶段，将重点集中在二体和准二体反应道的研究上，例如 $K_Lp\to\pi^+\Lambda$ 和 $K_Lp\to\pi^+\Sigma$ 等过程。类比于之前通过 $N\pi$ 末态过程研究核子共振态 N^* 的产生和性质，$K_Lp\to\pi^+\Lambda$ 和 $K_Lp\to\pi^+\Sigma$ 等过程是研究超子共振态的重要途径，同时也将为更好研究 $K^*(892)$ 和 $K^*(1420)$ 等奇异介子性质提供条件。历史上，$K_Lp\to\pi^+\Lambda$ 反应先被 SLAC 加

表 8 HIKE 实验计划开展的部分物理和实验目标[68]

阶段	束流粒子	实验目标
第一阶段	K^+	将 $K^+ \to \pi^+\nu\bar{\nu}$ 分支比的测量精度提高到 5%, 并将测量结果与理论值对比
第一阶段	K^+	对 $K^+ \to \pi^+e^+e^-$ 和 $K^+ \to \pi^+\mu^+\mu^-$ 过程进行精确测量
第一阶段	K^+	对稀有衰变 ($K^+ \to \pi^+\gamma\gamma, K^+ \to \pi^+\gamma\ell^+\ell^-, K^+ \to \pi^+\pi^0\gamma, K^+ \to \pi^+\pi^0e^+e^-$) 的实验测量进行改进更新
第一阶段	K^+	研究 K^+ 衰变中弱相互作用粒子的产生
第一阶段	K^+	在束流转储模式下收集数据集，大幅度提高寻找弱相互作用粒子的探测灵敏度，同时为第二阶段做准备
第二阶段	K_L	观察超稀有衰变 $K_L \to \pi^0e^+e^-$ 和 $K_L \to \pi^0\mu^+\mu^-$ 并在 $O\left(10^{-11}\right)$ 水平上设定衰变分支比上限
第二阶段	K_L	实现 $K_L \to \mu^+\mu^-$ 衰变分支比的测量精度达到 1%
第二阶段	K_L	在束流转储模式下进一步收集数据集, 并对第三阶段所需的中性束流进行调试
第三阶段	K_L	寻找其它能改变味道的中性电流衰变，例如 $K_L \to \pi^0\pi^0\nu\bar{\nu}$
第三阶段	K_L	寻找测量 K_L 衰变到弱相互作用粒子 X 的过程，例如 $K_L \to XX$

速器在 1974 年进行首次测量[79]，但 $\pi^+\Lambda$ 的总事例数仅有约 2500 个, 这也导致相关测量和研究受到限制。此次 GlueX 实验将保证与 SLAC 束流动量相同的前提下，将 K_L 截面的测量提高到前所未有的精度。此外，诸如弹性过程 $K_Lp \to K_Sp$ 和电荷交换过程 $K_Lp \to K^+n$ 等与超子产生相关的反应道也被列进 GlueX 实验的后续规划之中。

总之，GlueX 计划展开的介子束流实验将为探索超子共振态和奇异介子的性质提供数据，这将促进对奇异夸克能区介子谱的更好研究。此外，相关实验也能为格点 QCD 计算、重离子碰撞和宇宙学中的 QCD 热力学研究提供重要参考数据[80]。截止到目前，JLab 还未开始 K-A（K 介子束流与原子核碰撞）或者 π-A（π 介子束流与原子核碰撞）的相关实验，大部分实验还是主要利用 γp 光生反应研究与超核相关的物理。

1.4 EIC 上的介子束流实验

过去几十年，在 RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) 装置进行的高能重离子碰撞实验让我们对强相互作用物质在极端条件下的性质有了更深入的了解。EIC（Electron-Ion Collider）是美国正在规划中的一个大型加速器项目[81]，将在 RHIC 的原址上建造并保留 RHIC 的关键基础设备，同时将增设超导射频腔体等一系列超越现有科技水平的加速器与探测器尖端技术，以保证实现高亮度、高碰撞率与高探测率等 EIC 独有的关键特征。建成后的 EIC 设备将提供高能量、高亮度的极化电子-离子对撞实验数据，旨在探索核物质结构和动力学以及 QCD 相关的物理。在之前二十年，国际上的相关实验积累了较为丰富的强子光生和电生数据，它们无论在质量上还是在数量上都非常可观。相比之下，通过介子束流实验产生的相同强子末态的数据还较为缺乏, 且精度有限。这就导致很难与强子光生（或电生）数据形成互补, 不利于更好更深入的揭示强子物理中的相关问题。因此，测量并获取更高精度、更大能量和角度范围的介子束流实验数据, 不仅对于研究强子谱及相关物理有促进作用, 对于更好挖掘强子光生或电生数据的潜力也有积极意义。面对这一现状，建造一个先进的介子束流实验装置是十分必要的。

EIC 自 2015 年提出以来便被列为核物理学界设施建设的最高优先事项, 此后于 2019 年作为美国能源部项目启动；2021 年 6 月，该项目进入概念设计阶段，并在 2023 年底进入实施准备阶段；未来，EIC 将计划于 2025 年完成基线性能的最终设计决策并正式施工开始，并于 2030 年初开始设备运行。在文章《Physics Opportunities with Meson Beams for EIC》中[81]，基于 EIC 设备建造一个先进的介子束实验装置的设想被提出。该装置能够提供高能量、高强度的 π 和 K 介子束，与强子光生或电生实验形成互补，为深入理解强相互作用和 QCD 理论提供数据。其主要的物理目标如下：

- 重子激发态及相关物理研究。目前，实验上观测到的重子激发态远远少于夸克模型预言的重子激发态数目，这就是重子激发态“丢失”问题[82]。实验计划与强子光生或电生数据相互补充，利用介子束实验来研究重子激发态及相关物理，以验证不同模型的理论预言。
- 轻介子谱及相关物理的研究。众所周知, 对轻强子谱学的研究导致了色自由度和量子色动力学的发现。然而，直到目前人们对很多轻介子的性质仍知之甚少。利用介子束流实验进行这方面的实验测量不仅有利于澄清相关介子及奇特态的性质，也将为解释标量介子谱过剩及非微扰 QCD 提供重要信息。
- 强子结构方面的研究。利用实验产生的介子束流, 可直接测量介子的电磁形状因子等物理量，有利于揭示强子内部结构和动力学性质。

2 基于 HIAF 的介子束流实验展望

中科院近代物理研究所正在建设的强流重离子加速器装置（High Intensity heavy-ion Accelerator Facility，简

称 HIAF）能够提供高流强、宽能量范围的质子和离子束流。建成后，HIAF 与国际上同类装置比较，能够提供峰值流强最高的中低能重离子束流[83]。通常，任何质子或离子束均可用于产生次级强子束流，其中介子的贡献显著。特别是在次级束流为负分量情况下（即带负电的次级束流），介子成分将占据主导地位。因此，通过质子或离子束流产生的带负电的次级束流中，可以期望其组成为 97% 的 π^- 介子、2% 的 K^- 介子和不到 1% 的反质子。这种次级束流的强度通常比入射质子束的强度低 2 ～ 4 个数量级，它很大程度上取决于 3 个因素：次级束流的动量 (相对于质子束的动量)、束流动量分辨和介子束所需的平行度[1]。具体次级介子束流强度的计算通常要考虑特定的主加速器、主靶、准直器和偶极磁铁等的特性及具体参数[84]。但是，我们仍可以根据目前 HIAF 计划实现[85] 的质子束流能量（9.3 GeV）和强度（每脉冲粒子数 2.0×10^{12}）对可能产生的次级介子束流的能量和强度做一个粗略估算[2]，表9列出了具体数值。

理论上次级介子束流的能量可以接近主质子束流的最高能量, 但是当试图接近质子束流能量最大值 9.3 GeV 时，由于主束流的非单色性，将不可避免地将主质子和介子一起捕获到次级束流中，导致次级介子束流被质子污染。因此，考虑到实验的实际情况，我们选取次级束流能量 8 GeV 以下进行估计是合理的。此外，从表9中可以看到，次级介子束流对应的强度相较于其他介子束流实验（如 J-PARC 实验）的强度（见表3）并不逊色，这对于我们通过介子束流实验研究相关物理是有利的。需要提到，表9中的次级介子束流主要是 π 介子，K 介子仅占 1.2% 左右。显然，未来开展 π 介子束流实验优势明显。但考虑到 HIAF 上可能产生的次级介子束流强度整体较高，今后进行 K 介子束流实验也是可行的。

如果我们采用 4 ～ 8 GeV 能量的 π/K 介子束流与核子碰撞进行散射实验，则其质心能大致在 2.9 ～ 4.0 GeV 之间。这样一个能量范围对于研究轻强子谱学显然是足够了。表10列出了可在未来 HIAF 上的介子束流实验装置进行测量的部分散射过程。基于国内理论物理研究团队对相关强子散射过程的理论研究[6-26]，结果表明对这些散射过程进行高精度实验测量，有助于我们对强子谱及相关物理问题的深入理解。例如，可以通过测量 $K^-p\to a_0(1817)\Lambda$ 和 $K^-p\to\eta_1(1855)\Lambda$ 等散射过程，对轻介子谱及相关物理进行研究，澄清奇特介子态的产生机制和内部性质，为解释标量介子谱过剩及非微扰 QCD 提供重要信息。此外，还可以通过测量 $\pi^-p\to K^{(*)}\Sigma^{(*)}$ 及 $\pi^-p\to K^{(*)}\Lambda^{(*)}$ 等过程对重子激发态及相关物理进行研究（如寻找和确定隐奇异五夸克态等），为解释重子激发态“丢失”问题提供实验数据支持。

需要指出，针对具体的强子谱学研究所需要的实验束流及相关数据，要在获知 HIAF 详细实验参数基础上进行蒙特卡洛模拟才能确定。后续，我们也将与实验人员共同合作在这方面展开深入研究。

3　总结

在物质微观结构研究历程中，介子束流实验对核与粒子物理学的发展起了很大的推动作用，特别是在强子谱研究方面更是体现了其独特的优势并取得了一系列重要实验测量结果。介子束流一般指 π 或 K 束流，在加速器实验中容易产生和制备。通常，如果有稳定的质子束流，则容易产生次级介子束流。此外，也可采用 JLab 实验计划中提到的，通过高能光子束流打靶来产生介子束流。因此要考虑的主要问题是介子束流的能量和强度（或亮度），这涉及到具体的物理目标能区以及产生的事例数多少，需在今后针对具体研究目标进行深入具体讨论。

当前，国际上的相关加速器实验机构都比较重视介子束流实验。例如，日本 J-PARC 实验已经列出了利用介子束流研究相关物理问题的计划表。欧洲核子中心的 COMPASS 实验已经完成了所有实验计划和数据采集, 并计划建造新的 AMBER 实验替代 COMPASS 实验。此外, 欧洲核子中心还提出新的 HIKE 实验, 通过产生高强度 K 介子束流进行相关物理问题的研究。特别值得关注的是，主要开展强子光（电）生实验的 JLAB 和 EIC 实验机构也都提出了进行介子束流实验的计划。并在实验计划书中明确说明只有介子束流实验和强子光（电）生实验共同配合，互为补充，才能更有效发挥光（电）生数据的潜力，为深入揭示和研究强子物理相关问题提供数据。

在过去的几十年中,包括兰州重离子加速器（HIRFL）和北京正负电子对撞机（BEPC）在内的大科学工程装置的建设见证了我国核物理与粒子物理事业的发展和进步。未来即将建成的强流重离子加速器装置（HIAF）和计划中的中国极化电子离子对撞机[86-87](EicC) 也将有力促进我国核物理与强子结构方面的研究再上新台阶。目前，北京正负电子对撞机上的 BESIII 实验是国际上几大高能物理实验装置之一，在强子谱研究方面取得了一系列标志性成果。例如，BESIII 在实验中[88] 首次发现四夸克物质的候选者 $Z_c(3900)$, 该成果也被美国物理学会

[1]当介子束以平行的方式传播时，其平行度很高，介子的运动方向几乎完全平行。如果介子束不够平行，就会导致束流的扩散和偏移，从而影响实验的准确性和可重复性。

[2]我们的计算结果在量级层面是可靠的，但考虑到实验的复杂性且并没有采用蒙特卡洛方法进行实际模拟，所以难免存在与实际值相差 1 ～ 2 倍的误差。

表 9 基于 HIAF 的质子束流可能产生的次级介子束流参数
（次级介子束流由 98.8% 的 π 介子和 1.2% 的 K 介子组成）

介子束流能量	动量分辨	束流强度（以每脉冲的粒子数为单位）
4 GeV	±3%	束流强度预计比主质子束流低 100 倍，约为 2.0×10^{10}
6 GeV	±3%	束流强度预计比主质子束流低 1000 倍，约为 2.0×10^{9}
8 GeV	±3%	束流强度预计比主质子束流低 4 个量级，约为 2.0×10^{8}

表 10 未来 HIAF 上的介子束流实验可以测量的部分散射过程

$\pi^-p\to f_1(1285)n$	$K^-p\to f_1(1285)\Lambda$	$\pi^-p\to f_1(1420)n$	$K^-p\to f_1(1420)\Lambda$
$K^-p\to a_0(1817)\Lambda$	$K^-p\to \eta_1(1855)\Lambda$	$K^-p\to \phi(2170)\Lambda$	$K^-p\to \eta(2225)\Lambda$
$K^-p\to K^{(*)}N^{(*)}$	$\pi^-p\to K^{(*)}\Sigma^{(*)}$	$\pi^-p\to K^{(*)}\Lambda^{(*)}$	$\pi^-p\to K^{(*)}\Lambda(1405)$
$\pi^-p\to K^{(*)}\Lambda(1520)$	$K^-p\to K^{(*)}\Xi^{(*)}$	$\pi^-p\to \phi n$	$K^-p\to \phi\Sigma^{(*)}$
$K^-p\to \phi\Lambda$	$K^-p\to \phi(1850)\Lambda$	$K^-p\to \phi\Lambda(1405)$	$K^-p\to \phi\Lambda(1520)$

评为该年度物理学研究进展之首。然而我们应该认识到以 BESIII 实验为代表的正负电子对撞实验的局限性，介子束流实验可与之互为补充。尤其是近些年，理论研究表明介子束流实验是研究新强子态的有效途径。需要引起重视的是，我们基于国内的 HIAF 装置对可能产生的次级介子束的能量和亮度等关键参数的分析结果表明，基于 HIAF 建造介子束流装置进行轻强子谱学及相关物理的研究是可行的。未来如能在 HIAF 上建成介子束流实验装置并对相关散射过程进行高精度测量，将助推强子谱学及相关物理的研究再上一个新台阶，为深刻理解强相互作用和 QCD 理论提供重要实验支撑。

综上所述，我国进行介子束流方面的实验规划和研究正当其时。鉴于当前国内强子谱研究在国际上所具备的影响力，以及通过几代粒子物理和核物理大科学工程装置的建造和相关实验的开展所具有的人才储备，建造我国自己的介子束流装置并开展相关强子物理实验应当提上日程。这将是我国强子谱研究在国际上占有一席之地之后继续为提升人们对物质世界认识水平贡献力量的一个契机。

参考文献

[1] NA62/KLEVER, US Kaon Interest Group, KOTO, *et al.* arXiv: 2204.13394, 2022.
[2] NA62, KLEVER. arXiv: 2009.10941, 2020.
[3] BORDONE M, BUTTAZZO D, ISIDORI G. Eur Phys J C, 2017, 77: 618. doi: 10.1140/epjc/s10052-017-5202-1.
[4] KTeV Collaboration, Alavi-Harati A, *et al.* Phys Rev Lett, 2004, 93: 021805. doi: 10.1103/PhysRevLett.93.021805.
[5] WORKMAN R L, *et al.* [Particle Data Group]. PTEP, 2022, 2022: 083C01. doi: 10.1093/ptep/ptac097.
[6] LIU Y R, CHEN H X, CHEN W. Prog Part Nucl Phys, 2019, 107: 237-320. doi: 10.1016/j.ppnp.2019.04.003.
[7] CHEN H X, CHEN W, LIU X. Phys Rept, 2016, 639: 1-121. doi: 10.1016/j.physrep.2016.05.004.
[8] CHEN H X, CHEN W, LIU X. Rept Prog Phys, 2023, 86: 026201. doi: 10.1088/1361-6633/aca3b6.
[9] ZOU B S. arXiv:1603.03927, 2016.
[10] LIN Q Y, WANG X Y. Eur Phys J C, 2022, 82: 1017. doi: 10.1140/epjc/s10052-022-10995-6.
[11] WANG X Y, ZHOU H F, LIU X. Phys Rev D, 2023, 108: 034015. doi: 10.1103/PhysRevD.108.034015.
[12] WANG X Y, ZENG F C, LIU X. Phys Rev D, 2022, 106: 036005. doi: 10.1103/PhysRevD.106.036005.
[13] XIANG J, WANG X Y, XU H, *et al.* Commun Theor Phys, 2020, 72: 115303. doi: 10.1088/1572-9494/abb7da.
[14] WANG X Y, HE J, CHEN X. Phys Rev D, 2020, 101: 034032. doi: 10.1103/PhysRevD.101.034032.
[15] WANG X Y, HE J. Eur Phys J A, 2019, 55: 152. doi: 10.1140/epja/i2019-12846-7.
[16] WANG X Y, HE J, CHEN X R, *et al.* Phys Lett B, 2019, 797: 134862. doi: 10.1016/j.physletb.2019.134862.
[17] WANG X Y, HE J, WANG Q, *et al.* Phys Rev D, 2019, 99: 014020. doi: 10.1103/PhysRevD.99.014020.
[18] WANG X Y, HE J. Phys Rev D, 2017, 96: 034017. doi: 10.1103/PhysRevD.96.034017.
[19] CHENG C, WANG X Y. Adv High Energy Phys, 2017, 2017: 9398732. doi: 10.1155/2017/9398732.
[20] WANG X Y, CHEN X R. Eur Phys J A, 2015, 51: 85. doi: 10.1140/epja/i2015-15085-0.
[21] LIU J, CHEN D Y, HE J. Eur Phys J C, 2021, 81: 965. doi: 10.1140/epjc/s10052-021-09766-6.
[22] GAO P, SHI J, ZOU B S. Phys Rev C, 2012, 86: 025201. doi:

10.1103/PhysRevC.86.025201.

[23] WU J J, DULAT S, ZOU B S. Phys Rev D, 2009, 80: 017503. doi: 10.1103/PhysRevD.80.017503.

[24] DORING M, OSET E, ZOU B S. Phys Rev C, 2008, 78: 025207. doi: 10.1103/PhysRevC.78.025207.

[25] WU F Q, ZOU B S. Chin Phys C, 2008, 32: 629. doi: 10.1088/1674-1137/32/8/008.

[26] XIE J J, ZOU B S, CHIANG H C. Phys Rev C, 2008, 77: 015206. doi: 10.1103/PhysRevC.77.015206.

[27] TAKAHASHI T [J-PARC KOTO]. arXiv:1906.02357, 2019.

[28] AOKI K, FUJIOKA H, GOGAMI T, *et al.* arXiv: 2110.04462, 2021.

[29] FUJIOKA H, HICKS K, IGARASHI Y, *et al.* arXiv: 1706.07916, 2017.

[30] KOJI SHIOMI, "Measurement of K_L^0 flux at the J-PARC neutral-kaon beam line for the $K_L^0 \to \pi^0 \nu\bar{\nu}$ experiment.", PhD, Kyoto U. (2012). doi: 2433/157765.

[31] KOSEKI T, ARAKAKI Y, CHIN Y H , *et al.* PTEP, 2012, 2012: 02B004. doi: 10.1093/ptep/pts071.

[32] NAGAE T, AHN J K , AKAZAWA Y, *et al.* AIP Conf Proc, 2019, 2130: 020015. doi: 10.1063/1.5118383.

[33] J-PARC E07 collaboration. Phys Rev Lett, 2021, 126: 062501. doi: 10.1103/PhysRevLett.126.062501.

[34] J-PARC E10 collaboration. Phys Lett B, 2014, 729: 39-44. doi: 10.1016/j.physletb.2013.12.062.

[35] YANG S B, AHN J K, AKAZAWA Y, *et al.* Phys Rev Lett, 2018, 120: 132505. doi: 10.1103/PhysRevLett.120.132505.

[36] SHIROTORI K, TAKAHASHI T N, ADACHI S, *et al.* Phys Rev Lett, 2012, 109: 132002. doi: 10.1103/PhysRevLett.109.132002.

[37] TAKAHASHI T N, ADACHI S, AGNELLO M, *et al.* JPS Conf Proc, 2018, 8: 022011. doi: 10.7566/JPSCP.8.022011.

[38] J-PARC E40 collaboration. Phys Rev C, 2021, 104: 045204. doi: 10.1103/PhysRevC.104.045204.

[39] J-PARC E15 collaboration. Phys Lett B, 2019, 789: 620-625. doi: 10.1016/j.physletb.2018.12.058.

[40] ASANO H, AIKAWA S, AJIMURA S, *et al.* AIP Conf Proc, 2019, 2130: 040018. doi: 10.1063/1.5118415.

[41] J-PARC E57 and E62 collaboration. JPS Conf Proc, 2019, 26: 023013. doi: 10.7566/JPSCP.26.023013.

[42] J-PARC E36 collaboration. Phys Lett B, 2022, 826: 136913. doi: 10.1016/j.physletb.2022.136913.

[43] KOTO collaboration. Phys Rev D, 2020, 102: 051103. doi: 10.1103/PhysRevD.102.051103.

[44] HILL R J, PLESTID R and ZUPAN J. arXiv: 2310.00043, 2023.

[45] NOUMI H. PoS, 2013, Hadron2013: 031. doi: 10.22323/1.205.0031

[46] LHCb Collaboration. Phys Rev Lett, 2015, 115: 072001. doi: 10.1103/PhysRevLett.115.072001

[47] LHCb Collaboration. Phys Rev Lett, 2019, 122: 222001. doi: 10.1103/PhysRevLett.122.222001

[48] WU J J, MOLINA R, OSET E, *et al.* Phys Rev Lett, 2010, 105: 232001. doi: 10.1103/PhysRevLett.105.232001.

[49] WANG W L, HUANG F, ZHANG Z Y, *et al.* Phys Rev C, 2011, 84: 015203. doi: 10.1103/PhysRevC.84.015203.

[50] YANG Z C, SUN Z F, HE J, *et al.* Chin Phys C, 2012, 36: 6. doi: 10.1088/1674-1137/36/1/002.

[51] WU J J, LEE T -S H, ZOU B S. Phys Rev C, 2012, 85: 044002. doi: 10.1103/PhysRevC.85.044002.

[52] LI X Q, LIU X. Eur Phys J C, 2014, 74: 3198. doi: 10.1140/epjc/s10052-014-3198-3.

[53] CHEN R, LIU X, LI X Q, *et al.* Phys Rev Lett, 2015, 115: 132002. doi: 10.1103/PhysRevLett.115.132002.

[54] KARLINER M, ROSNER J L. Phys Rev Lett, 2015, 115: 122001. doi: 10.1103/PhysRevLett.115.122001.

[55] COMPASS collaboration. Nucl Instrum Meth A, 2015, 779: 69-115. doi: 10.1016/j.nima.2015.01.035.

[56] COMPASS collaboration. Phys Rev Lett, 2010, 104: 241803. doi: 10.1103/PhysRevLett.104.241803.

[57] COMPASS collaboration. arXiv: 2310.09249, 2023.

[58] COMPASS and AMBER collaborations, EPJ Web Conf, 2022, 274: 03010. doi: 10.1051/epjconf/202227403010.

[59] COMPASS collaboration. Eur Phys J C, 2023, 83: 924. doi: 10.1140/epjc/s10052-023-11359-4.

[60] COMPASS collaboration. SciPost Phys Proc,2022, 8: 028. doi: 10.21468/SciPostPhysProc.8.028.

[61] COMPASS collaboration. PoS, 2022, PANIC2021: 380. doi: 10.22323/1.380.0380.

[62] COMPASS Collaboration. Phys Rev D, 2022, 105: 012005. doi: 10.1103/PhysRevD.105.012005.

[63] COMPASS Collaboration. doi: 10.1142/9789811219313_0078.

[64] COMPASS Collaboration. PoS, 2019, DIS2019: 207 . doi: 10.22323/1.352.0207.

[65] COMPASS Collaboration. JPS Conf Proc, 2019, 26: 031003. doi: 10.7566/JPSCP.26.031003.

[66] ADAMS B, AIDALA C A, AKHUNZYANOV R, *et al.* arXiv: 1808.00848, 2018.

[67] SEITZ B. PoS, 2023, ICHEP2022: 839. doi: 10.22323/1.414.0839.

[68] HIKE Collaboration. arXiv: 2211.16586, 2022.

[69] HIKE Collaboration. arXiv: 2311.08231, 2023.

[70] HIKE Collaboration. J Phys Conf Ser, 2023, 2446, 012036. doi: 10.1088/1742-6596/2446/1/012036.

[71] NA62 Collaboration. JHEP, 2021, 06: 093. doi: 10.1007/JHEP06(2021)093.

[72] FILIPPI A. PoS, 2019, Confinement2018: 075. doi: 10.22323/1.336.0075.

[73] ACCARDI A, ACHENBACH P, ADHIKARI D, *et al.* arXiv: 2306.09360, 2023.

[74] GlueX Collaboration. Phys Rev Lett, 2019, 123, 072001. doi: 10.1103/PhysRevLett.123.072001.

[75] JPAC Collaboration. Phys Rev D, 2019, 100: 034019. doi: 10.1103/PhysRevD.100.034019.

[76] GlueX Collaboration. Phys Rev C, 2023, 108: 025201. doi: 10.1103/PhysRevC.108.025201.

[77] DURAN B, MEZIANI Z E, JOOSTEN S, *et al.* Nature, 2023, 615: 813-816. doi: 10.1038/s41586-023-05730-4.

[78] GlueX Collaboration. arXiv: 1707.05284, 2017.

[79] GlueX Collaboration. EPJ Web Conf, 2022, 271: 07005. doi: 10.1051/epjconf/202227107005.

[80] GlueX Collaboration. EPJ Web Conf, 2022, 271: 02001. doi: 10.1051/epjconf/202227102001.

[81] BRISCOE W J, DÖRING M, HABERZETTL H, *et al.* arXiv: 2108.07591, 2021.

[82] ZOU Bing-Song. Nuclear Physics Review, 2005, 22(4): 351. (in Chi-

nese) doi: 10.11804/NuclPhysRev.22.04.351 (邹冰松. 原子核物理评论，2005, 22(4): 351.)

[83] XIAO Guoqing, XU Hushan, WANG Sicheng. Nuclear Physics Review, 2017, 34(3): 275. (in Chinese) doi: 10.11804/NuclPhysRev.34.03.275 (肖国青, 徐瑚珊, 王思成. 原子核物理评论, 2017, 34(3): 275.)

[84] 李澄，核与粒子物理实验方法 [M], 科学出版社,2021,306-308.

[85] HIAF project Team. AAPPS Bull, 2022, 32: 35. doi: 10.1007/s43673-022-00064-1.

[86] CAO Xu, CHANG Lei, CHANG Ningbo, et al. NUCLEAR TECHNIQUES, 2020, 43(02): 1. (in Chinese) doi: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.020001 (曹须, 常雷, 畅宁波, 等. 核技术, 2020, 43(02): 1.)

[87] ANDERLE D P, BERTONE V, CAO X, *et al.* Front Phys(Beijing), 2021, 16: 64701. doi: 10.1007/s11467-021-1062-0.

[88] BESIII Collaboration. Phys Rev Lett, 2013, 110: 252001. doi: 10.1103/PhysRevLett.110.252001.

Development status and future plan of meson beam experiments at home and abroad

Xiao-Yun WANG[1,2], Xiang LIU[3,2,4,5]

(*1. School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, china;*
3. School of Physical Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
2. Lanzhou Center for Theoretical Physics, Key Laboratory of Theoretical Physics of Gansu Province, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China;
4. Key Laboratory of Quantum Theory and Applications of MoE, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
5. MoE Frontiers Science Center for Rare Isotopes, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Meson beam and nucleus collision experiments have played an important role in the field of nuclear physics and particle physics at medium and high energies, especially in the study of hadron spectroscopy, where a series of important experimental measurements have been achieved. In this paper, several typical meson beam experiments in the world are summarized, including J-PARC experiment in Japan, COMPASS experiment, AMBER experiment and HIKE experiment planned at CERN, GlueX experiment and EIC project at JLab in the United States. Furthermore, parameters of secondary meson beam are estimated based on HIAF facility in China, and physical measurements are discussed. Through the investigation of these experimental projects, the purpose is to provide some inspiration and reference for the further planning and construction of meson beam experimental equipment in China and the related research on hadron physics.

Key words: Meson beam experiment; Hadron physics; Intermediate and High Energy Nuclear Physics

Received date: 22 Mar. 2024; **Revised date:** 22 Mar. 2024

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11175257,12247101,12335001,11825503,12065014); The project for top-notch innovative talents of Gansu province; Fundamental Research Funds for the Central Universities; West Light Foundation of The Chinese Academy of Sciences, Grant No. 21JR7RA201

Corresponding author: Xiang LIU, E-mail: xiangliu@lzu.edu.cn